МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62.593 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-379-384

Влияние параметров рекуперативного объема на динамические характеристики пневмопривода при торможении*

А. Н. Сиротенко[1], С. А. Партко[2], Ваел Саллум[3]**

[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.
[3]Алеппо университет, г. Алеппо, Сирия

Effect of recuperative volume parameters on dynamic characteristics of pneumatic drive under braking***

A. N. Sirotenko[1], S. A. Partko[2], Wael Salloum[3]***

[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation.
[3]University of Aleppo. Aleppo, Syria

Введение. Рассмотрены способы энергосбережения в пневматическом приводе. Интерес представляет способ торможения созданием противодавления в выхлопной полости пневмопривода. При этом энергия сжатого воздуха накапливается в рекуперативном объеме. Задавая начальные параметры рекуперативного объема, возможно управлять динамикой торможения. Цель работы — создание математической модели, описывающей динамические процессы, происходящие в пневматическом приводе при торможении противодавлением, с постоянной массой, заключенного в полостях пневмодвигателя воздуха, и с учетом изменения начальных параметров тормозного объема.

Материалы и методы. Предложена математическая модель, описывающая изменение скорости движения выходного звена, давлений и температур в полостях пневмопривода в зависимости от начальных параметров рекуперативного объема. Решение математической модели осуществлялось методом численного интегрирования.

Результаты исследования. Получены зависимости скорости выходного звена, давлений и температур в полостях пневмопривода от начальных параметров рекуперативного объема. Адекватность полученной математической модели подтверждена по критерию Фишера.

Обсуждения и заключения. Полученные результаты могут быть полезны для решения задач энергосбережения в пневмоприводах при организации торможения противодавлением. Применение рекуперативного объема повышает технологическую гибкость привода при его переналадке и расширяет возможности энергосбережения.

Introduction. Methods of energy saving in pneumatic drive are considered. The method of braking by creating back pressure in the exhaust cavity of the pneumatic actuator is of interest. Under braking, the compressed air energy is stored in the recuperative volume. It is possible to control the braking dynamics through setting the initial parameters of the recuperative volume. The work objective is to create a mathematical model describing the dynamic processes taking place in the pneumatic drive under braking by backpressure, with a constant mass enclosed in the cavities of the air motor, and considering variation of the initial parameters of the braking volume.

Materials and Methods. A mathematical model is proposed that describes the speed change of the output link, pressures and temperatures in the cavities of the pneumatic drive depending on the initial parameters of the recuperative volume. The solution to the mathematical model is carried out by the numerical integration method.

Research Results. The dependences of the output link velocity, pressures and temperatures in the pneumatic drive cavities on the initial parameters of the recuperative volume are obtained. Adequacy of the built mathematical model is confirmed by Fisher's criterion.

Discussions and Conclusions. The results obtained can be used to solve the problems of energy saving in pneumatic drives under the organization of backpressure braking. The use of recuperative volume increases the technological flexibility of the drive during its readjustment and extends the possibilities of energy saving.

Ключевые слова: пневматический привод, рекуперация, энергосбережение, противодавление, торможение, рекуперативный объем.

Keywords: pneumatic drive, recuperation, energy saving, backpressure, braking, recuperative volume

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: andsirotenko@yandex.ru, parlana@spark-mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования. Сиротенко, А. Н. Влияние параметров рекуперативного объема на динамические характеристики пневмопривода при торможении / А. Н. Сиротенко, С. А. Парко, Вael Саллум // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 4. — С. 379-384. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-379-384.

For citation: A.N. Sirotenko, S.A. Partko, Wael Salloum. Effect of recuperative volume parameters on dynamic characteristics of pneumatic drive under braking. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 379-384. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-379-384.

Введение. Пневматические приводы широко применяются для автоматизации и механизации вспомогательных технологических процессов. Энергопотребление пневмофицированного оборудования может составлять более 20% общего потребления предприятия. Поэтому вопросы энергосбережения в пневмоприводах являются весьма актуальными [1–3]. Такие особенности, как сжимаемость рабочей среды и инерционность выходных звеньев, затрудняют безударное торможение, усложняют управление и конструкцию привода [1, 3, 4]. Управлять законом торможения пневмопривода можно как воздействием на регулирующее устройство [1, 2, 5, 6], так и выбором рационального способа торможения [7–9].

Перечисленные особенности пневмопривода позволяют использовать сжатый воздух, как тормозной демпфер и накапливать энергию торможения, что эффективно реализуется при торможении пневмопривода способом противодавления [7]. Изменяя координату переключения на торможение, давление в тормозной и нагнетательной полости, подключая к выхлопной полости дополнительный объем, возможно не только обеспечить безударное торможение, но и рекуперировать энергию сжатого при торможении воздуха [2, 7, 10]. Задавая начальные параметры рекуперативного объема, можно влиять на тормозные и энергоскоростные параметры пневмопривода. Однако данный вопрос исследован в настоящее время недостаточно.

Цель исследования — создание математической модели, описывающей динамические процессы, происходящие в пневматическом приводе при торможении противодавлением, с постоянной массой, заключенного в полостях пневмодвигателя воздуха и с учетом изменения начальных параметров тормозного объема.

Постановка задачи. Требуется математически описать зависимость динамических характеристик пневматического привода при торможении противодавлением от начальных параметров рекуперативного объема.

Математические зависимости. Рассмотрим торможение способом противодавления путем полного перекрытия магистралей нагнетания и выхлопа. Недостатком способа является то, что при изменении рабочего перемещения и внешней нагрузки на выходное звено необходимо заново настраивать координату включения торможения. Альтернативой является подключение в момент торможения к тормозной полости пневмодвигателя рекуперативного объема. Задавая его начальные параметры до торможения, возможно влиять на конечное давление в тормозном объеме и тормозной путь выходного звена пневматического привода [8].

Для математического описания газодинамических процессов, протекающих в полостях пневмопривода, были сделаны следующие допущения [10, 12]: давление в магистралях принимаем постоянным; термодинамические процессы, протекающие в полостях пневмопривода, рассматриваем как адиабатные; рабочую среду в полостях пневмопривода, сжатую при торможении, рассматриваем как идеальный газ.

В основе торможения противодавлением лежит принцип создания силы сопротивления движению выходного звена пневмодвигателя. Это достигается частичным или полным перекрытием каналов нагнетания и выхлопа. Полное перекрытие более эффективно, так как отсутствует сброс сжатого при торможении воздуха из тормозной полости. Динамика пневмопривода до торможения определяется известной системой уравнений, учитывающей подкритический и надкритический режимы истечения [10].

Параметры пневмопривода показаны на рис. 1. Параметры рабочей среды обозначены как: $V_м$, $p_м$, $T_м$ — объем, давление и температура сжатого в магистрали воздуха соответственно; $V_п$, $p_п$, $T_п$, — объем, давление, температура воздуха, сжатого в поршневой полости пневмодвигателя; $V_ш$, $p_ш$, $T_ш$ — объем, давление, температура воздуха сжатого штоковой или тормозной полости пневмодвигателя; $V_{рек}$, $p_{рек}$, $T_{рек}$ — объем, давление, температура сжатого воздуха в рекуперативном объеме; $V_{ат}$, $p_{ат}$, $T_{ат}$ — объем, давление, температура атмосферного воздуха. Геометрические параметры пневмодвигателя имеют следующее обозначение: $F_п$, $F_ш$ — поршневая и штоковая рабочие площади пневмодвигателя; $f_н$, $f_в$ — площади проходных сечений магистралей нагнетания и выхлопа соответственно; x, $x_{0п}$, $x_{0ш}$ — координаты текущего перемещения, постоянного поршневого и штокового «пассивных» объемов соответственно; s — максимальный рабочий ход; P — полезная нагрузка.

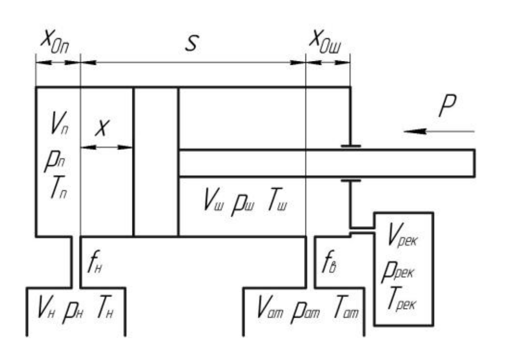


Рис. 1. Параметры пневмопривода при торможении противодавлением в рекуперативный объем

При торможении в полостях пневмодвигателя находится постоянное количество сжатого воздуха. Считаем, что теплообмен с окружающей средой незначителен, поэтому термодинамический процесс считаем адиабатным, с показателем адиабаты $k=1,4$ [10]. Для торможения золотник распределителя переключится в нейтральное положение и перекроет проходные каналы магистралей нагнетания и выхлопа ($f_н=0,\ f_в=0$). Время переключения золотника распределителя не учитываем, каналы нагнетания и выхлопа перекрываются одновременно. Соединение рекуперативного объема с штоковой полостью пневмодвигателя считаем мгновенным.

С учетом данных допущений полости, давление рабочей среды в поршневой полости пневмодвигателя представим в следующем виде:

$$p_п=(v_{пт}/v_п)^k\cdot p_{пт}, \qquad (1.1)$$

где $p_п$, $p_{пт}$ — текущее и начальное давление в момент переключения на торможение в поршневой полости пневмодвигателя; $v_п$, $v_{пт}$ — текущий и начальный удельные объемы поршневой полости пневмодвигателя; k — показатель адиабаты.

Сократим уравнение (1.1), разделив его на площадь поршня пневмодвигателя:

$$p_п=((x_{0п}+x_т)/(x_{0п}+x))^k\cdot p_{пт}, \qquad (1.2)$$

где $x_{0п}$, $x_т$, x — координаты: начальная, включения торможения и текущего положения поршня пневмодвигателя соответственно.

В момент переключения распределителя на торможении рекуперативный и тормозной объемы объединяются, в этом случае параметры сжатого воздуха определятся следующие системой (1.3):

$$(1.3)\ \begin{cases} p_{шт}\cdot v_{шт}^k = p\cdot v_1^k & (1.3.1)\\ p_{рек}\cdot v_{рек}^k = p\cdot v_2^k & (1.3.2)\end{cases}$$

где $v_{шт}$, $v_{рек}$ — удельные объемы сжатого в начале торможения в штоковой полости и рекуперативном объеме воздуха; v_1, v_2 — «условные» удельные объемы воздуха в штоковой полости и рекуперативном объеме; $p_{шт}$, $p_{рек}$, p — давления сжатого вначале торможения воздуха в штоковой полости, рекуперативном объеме и в «объединенном» объеме соответственно.

В системе уравнений (1.3) выразим удельные объемы v_1, v_2:

$$(1.4)\ \begin{cases} p_{шт}\cdot v_{шт}^k = p\cdot v_1^k \Rightarrow p_{шт}\cdot\left(\dfrac{V_{шт}}{m_{шт}}\right)^k = p\cdot\left(\dfrac{V_1}{m_{шт}}\right)^k \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{шт}\cdot\left(p_{шт}\right)^{\frac{1}{k}} = V_1\cdot\left(p\right)^{\frac{1}{k}} & (1.4.1)\\ p_{рек}\cdot v_{рек}^k = p\cdot v_2^k \Rightarrow p_{рек}\cdot\left(\dfrac{V_{рек}}{m_{рек}}\right)^k = p\cdot\left(\dfrac{V_2}{m_{рек}}\right)^k \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{рек}\cdot\left(p_{рек}\right)^{\frac{1}{k}} = V_2\cdot\left(p\right)^{\frac{1}{k}} & (1.4.2)\end{cases}$$

где $V_{шт}$, $V_{рек}$, — штоковый и рекуперативный объемы соответственно на момент начала торможения,; V_1, V_2 — штоковый и рекуперативный объемы, соединенные в «объединенный» объем; $m_{шт}$, $m_{рек}$ — масса воздуха, сжатого в штоковом и рекуперативном объёме на момент начала торможения; p — давление в «объединенном» объеме.

Для определения давления в «объединенном» объеме просуммируем уравнения (1.4.1) и (1.4.2):

$$p = \left(\frac{V_{шт} \cdot \left(p_{шт}\right)^{\frac{1}{k}} + V_{рек} \cdot \left(p_{рек}\right)^{\frac{1}{k}}}{V_1 + V_2} \right)^k , \qquad (1.5)$$

Используя уравнение Клапейрона, найдем температуру рабочей среды в «объединенном» объеме:

$$p \cdot v = R \cdot T \Rightarrow T = \frac{p \cdot v}{R} = \frac{p}{R} \cdot \left(\frac{V_{шт} + V_{рек}}{\frac{V_{шт}}{v_{шт}} + \frac{V_{рек}}{v_{рек}}} \right) , \qquad (1.6)$$

где T — температура сжатого при торможении в «объединенном» объеме воздуха; R — универсальная газовая постоянная,.

Окончательную зависимость температуры воздуха в тормозной полости пневмопривода от начальных параметров рекуперативного объема получим, раскрыв значения удельных объемов в уравнении (1.6) и сократив его на площадь штоковой полости пневмодвигателя:

$$T = p \cdot ((s + x_{0ш} + h_{рек} - x) \frac{T_{шт} \cdot T_{рек}}{(s + x_{0ш} - x) \cdot T_{рек} \cdot p_{шт} + h_{рек} \cdot T_{шт} \cdot p_{рек}})) \qquad (1.7)$$

где $h_{рек}$ — приведенный к штоковой площади пневмодвигателя, рекуперативный объем; T, $T_{шт}$, $T_{рек}$ — абсолютные температуры в «объединенном», штоковом и рекуперативном объемах соответственно.

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2x}{dt^2} = p_n \cdot F_n - P - p_ш \cdot F_ш & (1.8.1) \\ p_n = \left(\dfrac{x_{0n} + x_m}{x_{0n} + x}\right)^k \cdot p_{nm} & (1.8.2) \\ p = \left(\dfrac{\left(s + x_{02} - x\right)\left(p_{шт}\right)^{\frac{1}{k}} + h_{рек}\left(\left(p_{рек}\right)^{\frac{1}{k}}\right)}{\left(s + x_{02} + h_{рек} - x\right)} \right)^k & (1.8.3) \\ T_n = \left(\dfrac{p_{nm}}{p_n}\right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_{nm} & (1.8.4) \\ T = p \cdot ((s + x_{0ш} + h_{рек} - x) \dfrac{T_ш \cdot T_{рек}}{(s + x_{0ш} - x)T_{рек} \cdot p_ш + h_{рек} \cdot T_ш \cdot p_{рек}})) & (1.8.5) \end{cases} \qquad (1.8)$$

Движение поршня пневмодвигателя описывается уравнением (1.8.1). Общая система уравнений процесса торможения пневматического устройства будет иметь вид (1.8). Здесь: m — приведенная к штоку пневмодвигателя масса рабочего органа; $T_н$ — абсолютная температура воздуха в магистрали нагнетания; $T_{нт}$ — начальное значение

температуры воздуха в поршневой полости пневмодвигателя в момент переключения на торможения.

Уравнения (1.8.2) и (1.8.3) описывают изменение давления, а уравнения (1.8.4) и (1.8.5) — изменение температуры в поршневой и тормозной полостях пневмодвигателя соответственно.

Совместное решение системы уравнений, описывающей динамику торможения пневмопривода (1.8) и его разгон методом численного интегрирования Рунге-Кутта [14], позволяет изучить зависимость динамических характеристик пневмопривода от начальных параметров рекуперативного объема. Стендовая оценка характеристического совпадения теоретических и практических зависимостей показала удовлетворительную сходимость [13], что позволило провести проверку адекватности полученной математической модели по критерию Фишера. Для этого был проведен двухфакторный эксперимент. Независимыми факторами были выбраны начальное давление и величина рекуперативного объема. Факторы изменялись согласно трем уровням варьирования, что позволило использовать девять комбинаций сочетания факторов при повторении каждого опыта трижды.

Математическая модель адекватна практическим результатам, полученным при экспериментальной проверке, так как расчетное значение критерия Фишера составило 2,67, что меньше табличного (2,7) [15].

Полученные результаты позволили перейти к вычислительному эксперименту, который позволит определить рациональные комбинаций начальных параметров рекуперативного объема для заданного закона торможения пневмопривода и обеспечения при этом высоких энергоскоростных показателей.

Выводы:

1. Разработана математическая модель, адекватно описывающая динамические процессы, протекающие в полостях пневматического привода при торможении противодавлением с накоплением энергии сжатого воздуха в рекуперативный объем.
2. Получены математические зависимости параметров пневматического привода от начальных параметров рекуперативного объема при торможении противодавлением.

Библиографический список

1. Vladislav A. Blagojevic and Predrag Lj. Jankovic. Advantages of restoring energy in the execution part of pneumatic system with semi-rotary actuator / Vladislav A. Blagojevic, Predrag Lj. Jankovic. // THERMAL SCIENCE. Vol. 20, 2016, Suppl. 5, pp. S1599-S1609. DOI : https://doi.org/10.2298/TSCI16S5599B
2. Gennadyj Krytikov. The synthesis of structure and parameters of energy efficient pneumatic actuator / Gennadyj Krytikov, Marjana Strizhak, Vsevolod Strizhak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2017. vol. 1 №7 (85). pp.38-44. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92833
3. Mohd Yusop, M. Y. Energy Saving for Pneumatic Actuation using Dynamic Model Prediction: Submitted for the degree of PhD / M. Y. Mohd Yusop; School of Engineering. Cardiff University. – Wally, UK, 2006. – 212 p.
4. Vladislav Blagojevic. Cost effectiveness of restoring energy in execution part of pneumatic system / Vladislav Blagojevic, Dragan Šešlija and Miodrag Stojiljkovic // Journal of Scientific & Industrial Research. Vol. 70, February 2011, pp. 170-176. http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/10968
5. Дьяченко, А. Г. Разработка конструкции подающего устройства для цилиндрических деталей / А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина, М. В. Колпаков // Инновационные материалы и технологии: сб. статей по итогам междунар. науч.-практ. конф. — Стерлитамак, 2018. — С.11–13.
6. Долгов, Г. А. Система управления позиционным пневмоприводом запорной арматуры / Г. А. Долгов // Молодой исследователь Дона. — 2017. — № 3 (6). — С. 21–28.
7. Филипов, И. Б. Тормозные устройства пневмоприводов / И. Б. Филипов. — Москва : Машиностроение, 1987. — 143 с.
8. Дао, Т. А. Исследование точности позиционирования автоматизированного пневмопривода с внешним тормозным устройством / Т. А. Дао, В. С. Сидоренко, Д. Д. Дымочкин // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2015. — Т 15, № 4 (83). — С. 46–53. DOI : https://doi.org/10.12737/16077
9. Грищенко, В. И. Динамика процесса позиционирования приводов с гидроамортизатором / В. И. Грищенко, М. С. Килина, В. А. Чернавский // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2012. — Т. 12, № 4 (65). — С. 16–21.
10. Герц, Е. В. Динамика пневматических систем машин / Е. В. Герц. — Москва : Машиностроение, 1985. — 265 с.
11. Сиротенко, А. Н. Рекуперация энергии в пневмоприводе фасовочно-наполнительного оборудования / А. Н. Сиротенко, А. Г. Дьяченко, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного

машиностроения: сб. статей 6-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 16-й между-нар. агропром. выставки «Интерагромаш-2013». — Ростов-на-Дону, 2013. — С. 69–71.

12. Сиротенко А. Н. Математическая модель динамических процессов пневмопривода, при торможении противодавлением, с рекуперацией энергии в дополнительный объем / А. Н. Сиротенко, С. А. Партко, // Научное обозрение. — 2017. — № 21. — С. 67–74.

13. Sirotenko A.N., Partko S.A. Decrease in Power Inputs in Pneumodrive Weighing-and-Packing Machine//International Journal of Applied Engineering Research, 2017. vol. 12, № 14, pp. 4599-4603.

14. Расчет динамических параметров пневмогидравлического привода с рекуперацией энергии : свидетельство 2018613130 Рос. Федерация / А. Н. Сиротенко, С. А. Партко. — № 2018610340; заявл.10.01.2018; опубл. 02.03.2018.

15. Сиротенко, А. Н. Зависимость энергоскоростных характеристик пневмопривода от начальных параметров дополнительного объема, при торможении противодавлением / А. Н. Сиротенко, С. А. Партко, Саед Бакир Аля // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017. — Т 17, № 4 (91). — С. 69–76. DOI : https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-4-69-76

Поступила в редакцию 28.07 .2018
Сдана в редакцию 29.07.2018
Запланирована в номер 21.09.2018

Received 28.07 .2018
Submitted 29.07.2018
Scheduled in the issue 21.09.2018

Об авторах:

Сиротенко Андрей Николаевич,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9956-1032
andsirotenko@yandex.ru

Партко Светлана Анатольевна,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8568-0716
parlana@spark-mail.ru

Ваел Саллум,
профессор кафедры «Сельскохозяйственное машиностроение» Университет Алеппо (Сирия, г. Алеппо), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0032-2918
w_salloum@yahoo.com

Authors:

Sirotenko, Andrey N.,
associate professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9956-1032
andsirotenko@yandex.ru

Partko, Svetlana A.,
associate professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8568-0716
parlana@spark-mail.ru

Wael Salloum,
professor of the Agricultural Engineering Department, Aleppo University (Aleppo, Syria), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0032-2918
w_salloum@yahoo.com